

PRODOTTI ISOLANTI DI ORIGINE NATURALE: PROVE IN LABORATORIO E ANALISI PREDITTIVE SU UN CAMPIONE IN PAGLIA

di

* Alessandra Mesa, Alberto Arenghi

I prodotti isolanti presenti sul mercato sono svariati e con proprietà molto diverse tra loro. Questi materiali possono essere suddivisi in tre grandi macro categorie: isolanti di origine sintetica, di origine naturale minerale e infine isolanti di origine naturale vegetale.

I materiali di origine naturale vegetale sono prodotti che provengono da materie prime rinnovabili che non necessitano di particolari trattamenti per la loro messa in opera. Tra i più conosciuti vi sono sicuramente la fibra di legno, la fibra di cellulosa o il sughero, ma anche altri materiali si stanno ritagliando sempre più il loro spazio grazie alle ottime caratteristiche isolanti.

Come nei prodotti di origine minerale o sintetica, anche in questo caso le qualità isolanti dei materiali vengono indicate tramite caratteristiche termiche che ne descrivono le performance. Tra le proprietà indispensabili per definire il buon comportamento di un isolante si indicano il valore di conduttività λ [W/mK], di trasmittanza U [W/m²K] o di resistenza termica R [m²K/W].

I test per analizzare questi parametri sono molteplici e di diversa complessità. Le prove possono infatti essere condotte in situ, monitorando i valori dei materiali in condizioni reali, o in laboratorio. Nonostante le prove in situ, definite dalla UNI ISO 9869-1:2015 [3], forniscano interessanti informazioni riguardo al comportamento del materiale dopo la messa in opera, questi test sono però caratterizzati da un livello di incertezza troppo alto per poter considerare i valori ottenuti del tutto affidabili. Per tali ragioni quindi le performance termiche di un materiale isolante vengono solitamente testate tramite prove di laboratorio, che permettono di considerare variabili

limitate in condizioni controllate. La normativa in vigore suggerisce diversi metodi per il calcolo delle caratteristiche termiche, che variano in base alla tipologia dei materiali e alla strumentazione utilizzata nelle prove. Tra i metodi indicati troviamo quello della piastra calda con anello di guardia e del termoflussimetro [7], [6], [8], il metodo della doppia camera calibrata o con anello di guardia [2] ed infine il metodo che prevede l'utilizzo di una camera calda con termoflussimetro [4][1].

Tutte queste prove sono adatte per stratigrafie omogenee, o che presentino delle discontinuità non significative. I materiali di natura organica sono solitamente caratterizzati da una composizione fibrosa e non omogenea, risulta quindi a volte complesso delinearne le prestazioni termiche. Le prove di laboratorio descritte di seguito hanno avuto come obiettivo quello di analizzare il comportamento termometrico della paglia, così da proporla come materiale isolante ecosostenibile per l'edilizia. Le prove condotte in camera climatica purtroppo non hanno potuto seguire rigorosamente una metodologia proposta da normativa sia per la disomogeneità che caratterizza il materiale, sia perché le informazioni al riguardo sono poche trattandosi di un prodotto non comunemente utilizzato in edilizia.

Prove sperimentali in camera climatica

Le prove, realizzate presso il Laboratorio Pisa dell'Università degli studi di Brescia, hanno visto lo studio di una parete in paglia delle dimensioni di 108,5 x 117,5 cm². Il provino ha riprodotto fedelmente una stratigrafia spesso utilizzata per edifici di questo tipo: uno strato principale di paglia, che fornisce un ottimo isolamento termoacustico, protetto

esternamente da tre strati di intonaco di calce idraulica e internamente da tre strati di intonaco di argilla. La ballesta di paglia utilizzata per le prove presentava uno spessore totale di 38 cm. A seguito della posa degli strati di protezione si è verificata però una riduzione della profondità di all'incirca due centimetri, questo perché, trattandosi di un materiale fibroso, le prime mani di intonaco risultano quasi del tutto inglobate nella paglia. Per questo motivo il calcolo delle proprietà termiche della stratigrafia e la successiva realizzazione del modello numerico, descritte in seguito, sono state realizzate considerando uno strato di paglia pari a 36 cm di spessore.

Le soluzioni proposte attualmente sul mercato italiano prevedono che la paglia sia inserita all'interno di una struttura in legno, che svolge il ruolo strutturale. Per rappresentare fedelmente la realtà la parete di prova è stata quindi realizzata all'interno di un telaio in legno lamellare GL24H, che ha permesso inoltre di facilitare i movimenti del provino.

L'obiettivo dei test è stato quello di calcolare la conduttanza della parete e valutarne il valore al variare di umidità relativa. Sono state quindi condotte sei

prove in laboratorio che hanno previsto diverse condizioni al contorno, variando i valori di temperatura e umidità.

L'ambiente esterno è stato riprodotto con l'utilizzo della camera climatica, che ha permesso di settare valori di temperatura e umidità. Per quanto riguarda invece le condizioni interne i valori di temperatura sono stati raggiunti mediante il sistema di riscaldamento dell'edificio, mentre i valori di umidità richiesti sono stati ottenuti con l'utilizzo di un umidificatore a freddo, collegato a un sistema di controllo in grado di spegnere lo strumento una volta raggiunta la soglia impostata.

In fase di costruzione sono stati posizionati quattro sensori all'interno del provino (Figura 1), in modo tale da monitorare l'andamento di temperatura e umidità in corrispondenza dei singoli strati e verificare inoltre la possibile formazione di condensa interstiziale. Il flusso di calore attraverso la parete e il gradiente di temperatura, necessari per il calcolo della conduttanza, sono stati misurati rispettivamente mediante l'utilizzo di due piastre flussimetriche, posizionate sulla superficie interna, e due termocoppie posizionate su entrambe le facce del provino.

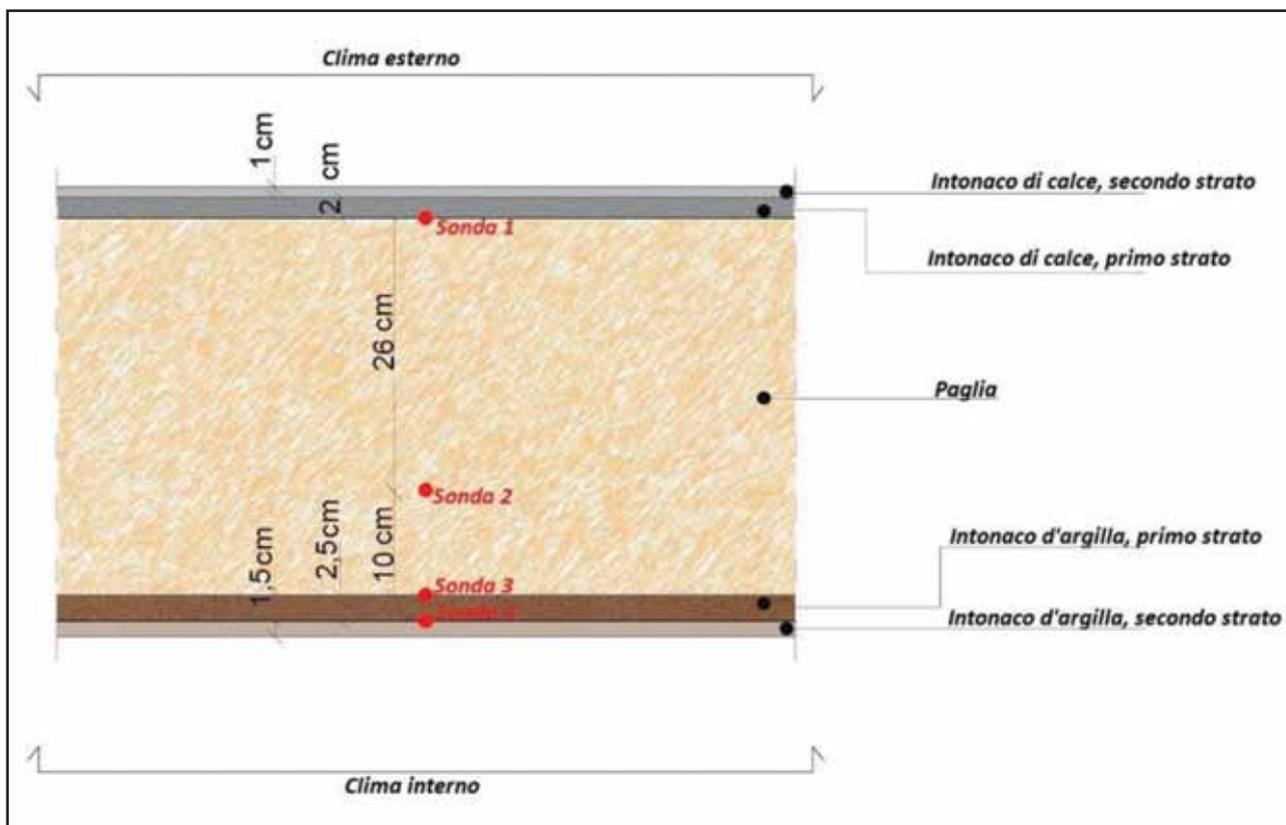


Figura 1: Posizione dei sensori di temperatura e umidità all'interno della parete

| | <i>Condizioni climatiche interne</i> | | <i>Condizioni climatiche esterne</i> | | <i>Ore (h)</i> |
|----------|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------|
| | Temperatura (°C) | Umidità Relativa (%) | Temperatura (°C) | Umidità Relativa (%) | - |
| Caso I | 26 | 50 | 5 | 50 | 95 |
| Caso II | 27 | 60 | 5 | 50 | 142 |
| Caso III | 27,5 | 50 | 55 | 50 | 194 |
| Caso IV | 25 | 50 | 10 | 70 | 93 |
| Caso V | 26 | 50 | 10 | 30 | 178 |
| Caso VI | 26,5 | 65 | 0 | 30 | 358 |

Tabella 1: Riassunto delle impostazioni di ogni singola prova

Non è stata stabilita a priori una durata relativa alle prove, le condizioni al contorno infatti sono state mantenute fino al raggiungimento di un equilibrio di temperatura e umidità all'interno della parete. Il primo approccio è stato quello di mantenere un valore costante di umidità tra ambiente interno e ambiente esterno. Tenendo in considerazione solo il gradiente di temperatura è stato infatti possibile limitare molti fattori in grado di influenzare il valore di conduttanza termica. Una volta superato questa prima fase, i valori di temperatura e umidità sono stati variati per entrambe le condizioni al contorno, come si riporta nella Tabella 1.

La raccolta dei dati monitorati tramite i sensori di temperatura e umidità ha confermato quanto era prevedibile dalla teoria. I valori di temperatura all'interno della parete tendono a stabilizzarsi in breve tempo, mentre i valori di umidità tra i vari strati necessitano di un periodo più lungo per arrivare ad un equilibrio.

Dopo una prima analisi dei dati monitorati è stato possibile calcolare il valore di conduttanza C della parete di prova, in accordo con il metodo delle medie progressive proposto dalla UNI EN ISO 6946 [1]:

$$C = \frac{\sum_j q_j}{\sum_j (T_{is,j} - T_{es,j})}$$

Conduttanza [W/m²K]

Flusso di calore [W/m²]

Temperatura superficiale interna [K]

Temperatura superficiale esterna [K]

Le analisi delle singole prove hanno mostrato valori che convergono verso un risultato comune di conduttanza pari a 0.12 W/m²K e una rispettiva resistenza termica di 8.33 m²K /W, definita in ac-

cordo con [1]. Per calcolare la conduttanza della parete sono state prese in considerazione solamente le prove di lunga durata, considerate più affidabili. Mettendo però a confronto l'andamento delle varie prove (Figura 2) si può comunque notare come il trend dei valori dei test scartati sembri comunque convergere verso lo stesso risultato. Il risultato di conduttanza ricavato risulta leggermente basso se confrontato con quelli di letteratura, che si assestano attorno a un valore di 0.17 W/m²K. È però importante sottolineare che la bibliografia al riguardo è abbastanza povera e i campi di ricerca sono ancora molti.

Grazie al valore di resistenza termica è stato possibile ricavare la conduttività della parete. Trattandosi di un materiale eterogeneo il calcolo di questo valore avrebbe dovuto seguire il metodo indicato per i materiali omogenei ed essere poi integrato con fattori di conversione suggeriti nella UNI EN ISO 10456 [5]. La carenza di informazioni riguardo al materiale però, non ha permesso di trovare un fattore di conversione adeguato. Si è perciò deciso di calcolare comunque il valore di conducibilità λ in conformità con la UNI EN ISO 6946 [1], solitamente utilizzata per i materiali omogenei. I valori di λ ottenuti variano in un range che oscilla tra 0.044 e 0.046 W/mK, confermando la paglia come un ottimo materiale isolante.

Anche in questo caso non è stato possibile trovare un riscontro con i dati di letteratura, dal momento che le ricerche al riguardo sono ancora troppo poche. Il valore sembra comunque accettabile considerando le buone proprietà isolanti della paglia sia dal punto di vista termico che dal punto di vista acustico. Se si confronta poi il risultato ottenuto con materiali simili per conformazione e natura, come la fibra di legno o la canapa, il valore di conducibilità λ risulta perfettamente in linea con quelli degli altri prodotti isolanti.

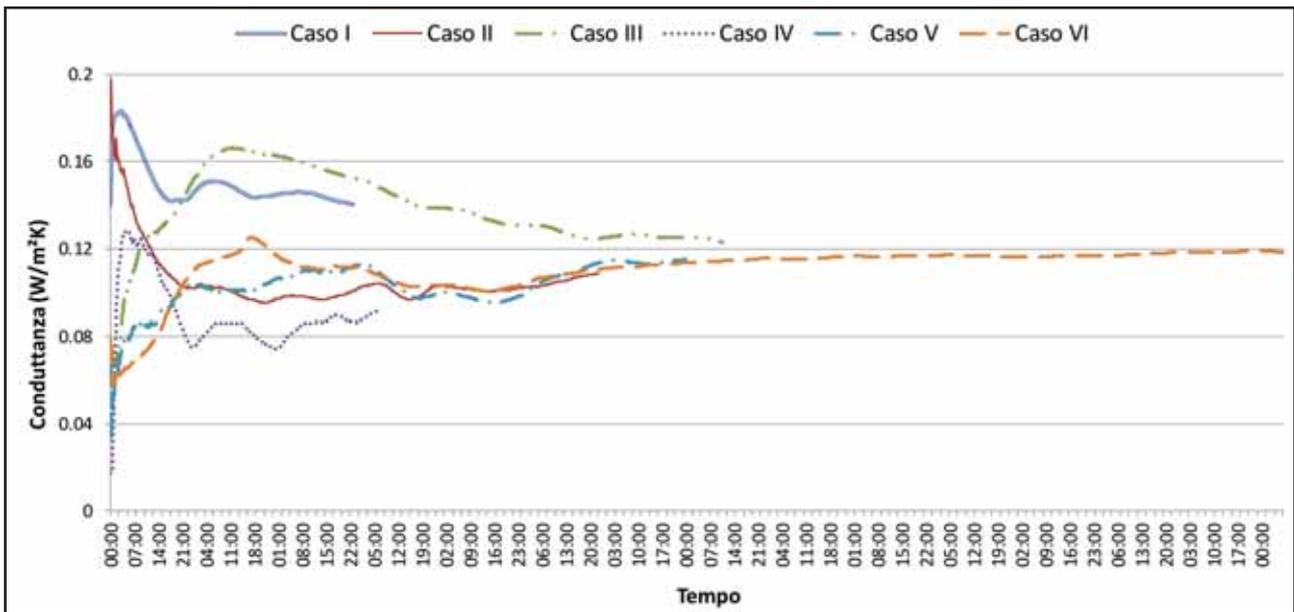


Figura 2: Confronto tra i valori di conduttanza termica delle varie prove

Modello numerico per analisi termoigrometrica con WUFI

Lo sviluppo più interessante delle prove di laboratorio è stato la realizzazione di un modello numerico corrispondente da poter utilizzare per il calcolo predittivo di nuove pareti. Per la realizzazione del modello è stato scelto il software WUFI, fornito dal Fraunhofer IBP, che si basa su calcolo dinamico e permette di descrivere in modo dettagliato le proprietà igrotermiche dei materiali.

Partendo quindi dai dati delle prove, da quelli di letteratura e da quelli presenti nel database del software, è stato possibile realizzare un modello numerico

che riproducesse il provino studiato in laboratorio. Come si può vedere nella Figura 3, sono stati inseriti dei punti di controllo nel modello in modo che corrispondano alla posizione delle sonde presenti nella parete di laboratorio. Tali posizioni hanno permesso di monitorare l'andamento di temperatura e umidità in punti specifici, e quindi poterli confrontare con i dati delle prove sperimentali.

Sono state condotte diverse simulazioni, cercando di rappresentare nel modo più fedele possibile il setting di laboratorio. Per questo motivo molte variabili considerate dal software sono state semplificate o addirittura omesse, così da riprodurre le condizioni

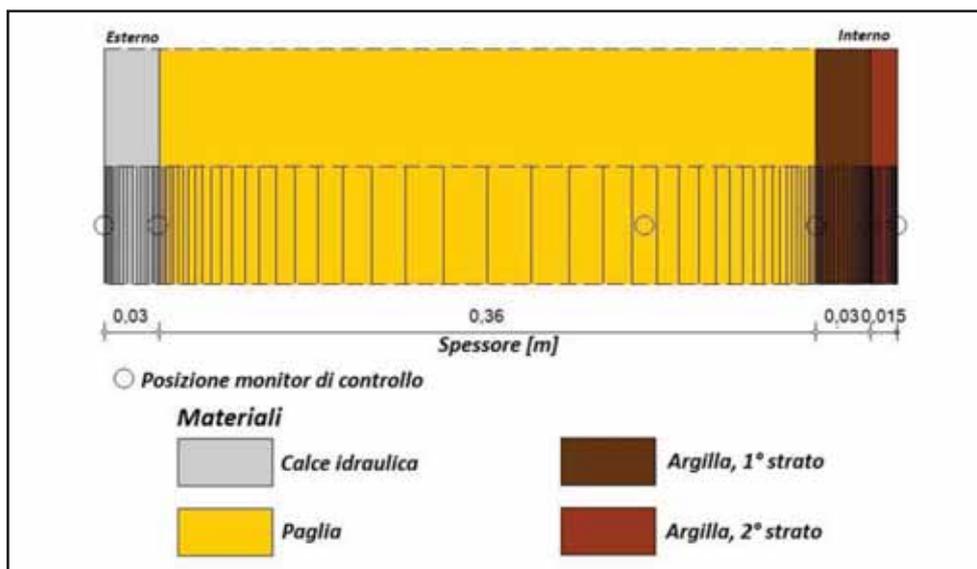


Figura 3: Composizione del modello numerico e posizione dei sensori all'interno della stratigrafia

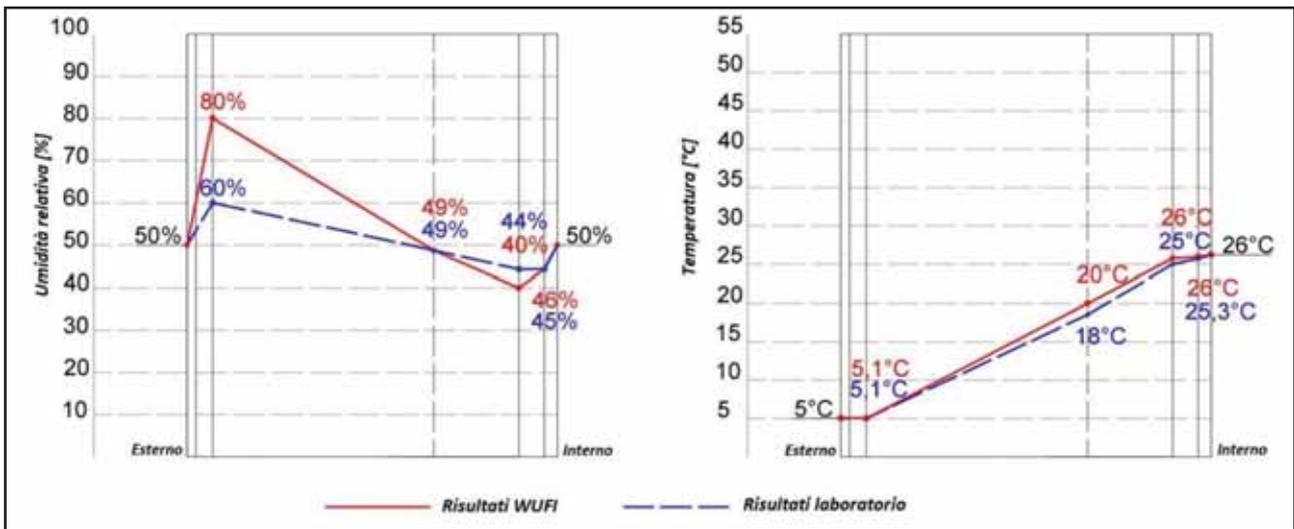


Figura 4: Confronto risultati tra i dati del laboratorio e il modello numerico. Durata della prova: 94 ore

stazionarie dei test in camera climatica. I valori di temperatura e umidità sono stati quindi impostati con valori costanti mentre i parametri aggiuntivi come orientamento e azione del vento, sono stati del tutto trascurati.

I risultati del modello numerico sono stati poi confrontati con quelli misurati dai sensori posizionati all'interno del provino. Per i test di durata minore è si è trovata una buona corrispondenza in termini di temperature, tra i valori forniti dalla prova di laboratorio e la simulazione con WUFI. I valori di umidità all'interno della parete si sono dimostrati invece più complessi da analizzare. Sono emerse infatti delle differenze, in alcuni punti significative, tra il modello numerico e il provino di laboratorio per quanto concerne alcuni test. La motivazione è legata probabil-

mente alla durata limitata dei test più brevi, che non ha permesso di raggiungere una stabilità all'interno della stratigrafia, e a valori di temperature al contorno tali da innescare meccanismi non considerati dal software, quali moti d'aria (Figura 4).

Soffermandosi invece sui dati relativi alle prove più lunghe si riscontra un'ottima corrispondenza tra la realtà sperimentale e il modello in WUFI. Questi test presentano infatti condizioni al contorno più vicine alla realtà e sono durati il tempo necessario per il raggiungimento dell'equilibrio di umidità interna. Un confronto tra i valori ottenuti (Figura 5) mostra infatti come in queste prove il modello numerico rappresenti fedelmente il comportamento del provino di laboratorio non solo in termini di temperatura, ma anche in termini di umidità relativa.

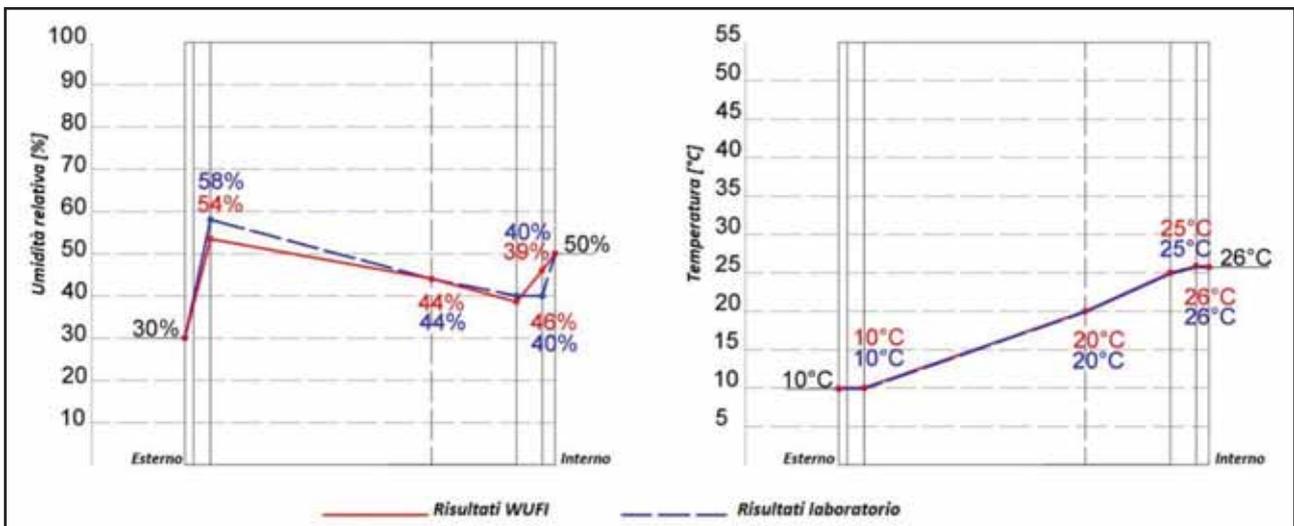


Figura 5: Confronto risultati tra i dati del laboratorio e il modello numerico. Durata della prova: 178 ore

Analisi predittive

La corrispondenza tra il caso sperimentale e la sua rappresentazione in WUFI in condizioni stazionarie ha permesso di utilizzare il modello numerico per analizzare altre stratigrafie. Questi studi predittivi sono molto utili per delineare le performance di componenti edilizi ancora in fase di progettazione, così da avere un'idea più attendibile di quello che sarà il comportamento a seguito della messa in opera del materiale.

Uno degli aspetti più interessanti di queste analisi è senza dubbio la flessibilità e la grande varietà di prove che possono essere condotte. Una volta validato il modello iniziale è possibile testare svariate pareti con condizioni interne variabili e climi differenti. Scelta quindi una rosa di soluzioni tecnologiche da testare sarà possibile vedere quale sia la scelta più performante in termini di comportamento igrotermico e a quale clima sia più adatta.

Si mostrano di seguito alcuni esempi di studi predittivi condotti per delineare il comportamento di pareti in paglia, diverse da quella proposta per le prove di laboratorio.

Le analisi sono state condotte utilizzando i dati climatici di Milano, per quanto riguarda le condizioni

esterne, mentre le condizioni interne sono state impostate in accordo con la UNI EN 15026 [9]. Per un materiale organico come la paglia la scelta degli strati di rivestimento, in particolare quello esterno, risulta essere fondamentale. Questo tipo di materiale necessita infatti di uno strato di finitura in grado di proteggere dalle infiltrazioni d'acqua, per evitare che queste portino a marcescenza, e che permetta inoltre al materiale di traspirare ed asciugare, così da mantenere il comfort dell'ambiente interno ottimale. Per questi motivi si è scelto di analizzare cinque soluzioni di pareti caratterizzate da uno strato principale di 36 cm di paglia e strati di finitura differenti, come illustrato nell'immagine di seguito (Figura 6).

Le analisi sono state condotte con l'obiettivo di verificare il contenuto di umidità all'interno della parete, così da controllare che non vengano raggiunti livelli critici tali da compromettere l'integrità del materiale. I grafici di Figura 7 e Figura 8 riportano rispettivamente il confronto tra le quantità di umidità totale contenuta nelle soluzioni proposte e quello relativo al contenuto di umidità presente nello strato di paglia.

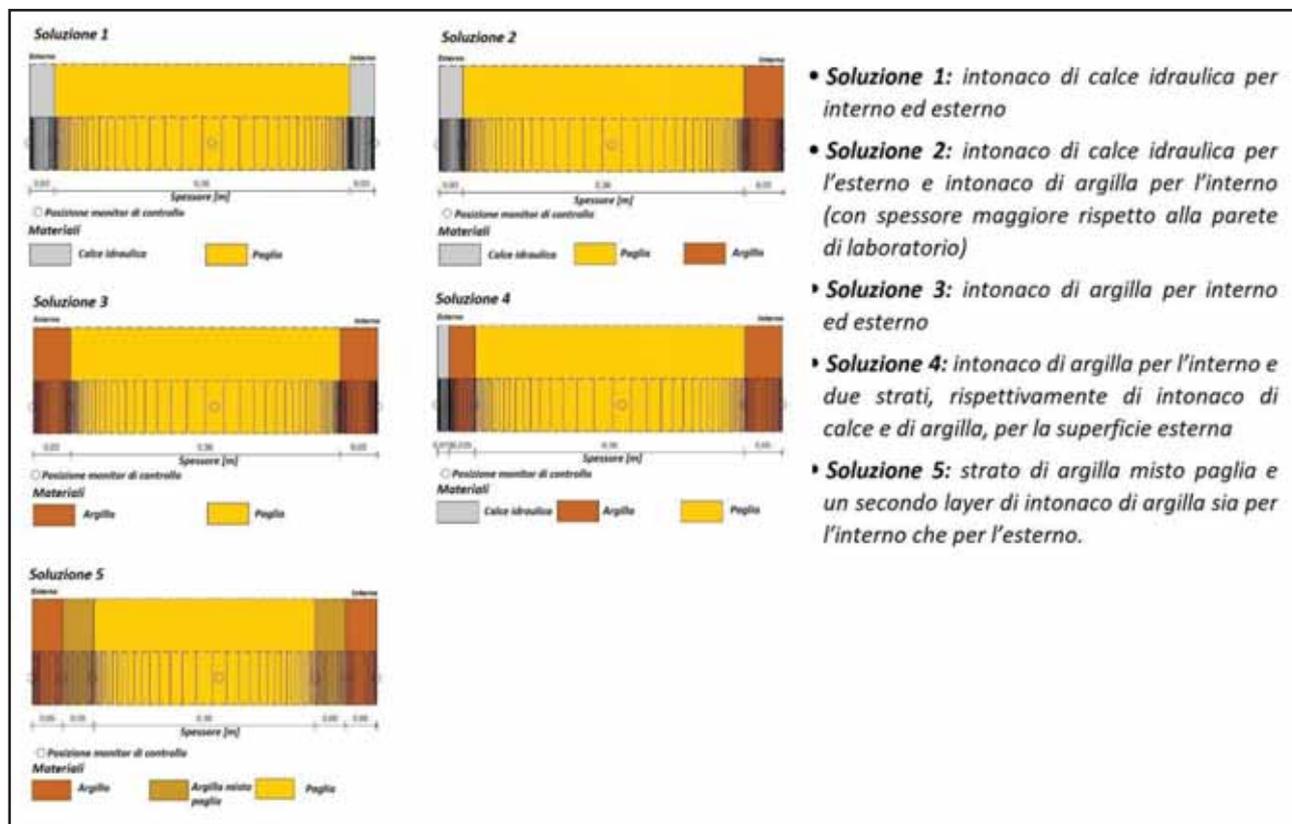


Figura 6: Stratigrafie analizzate per lo studio predittivo

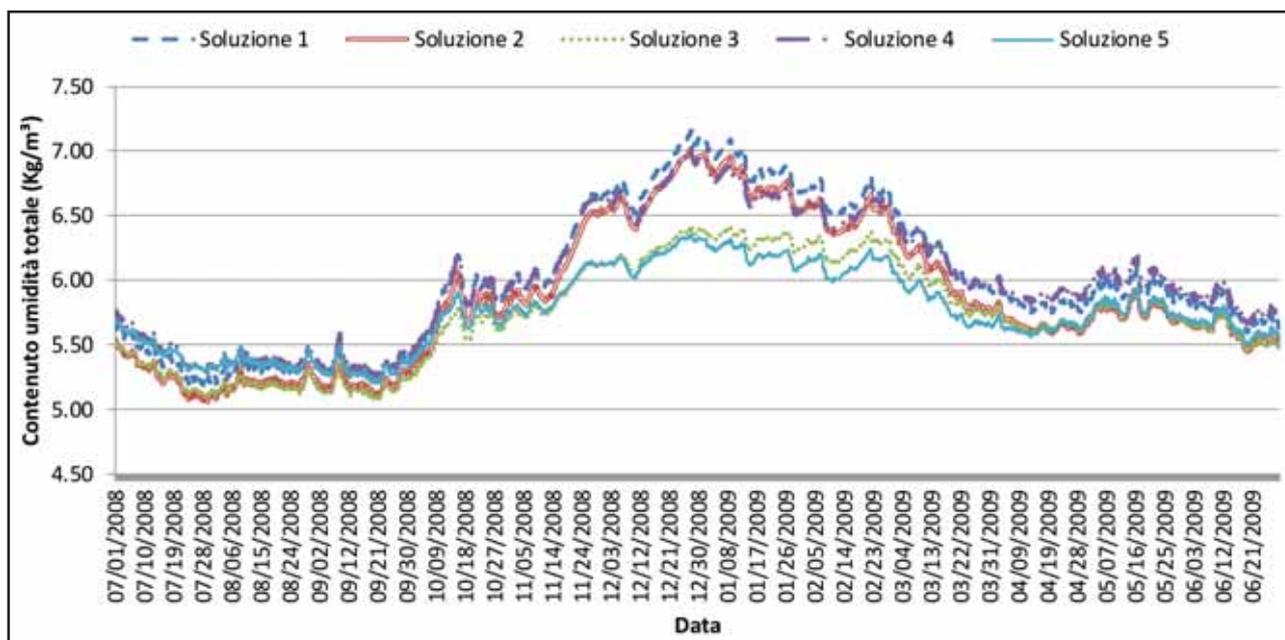


Figura 7: Andamento contenuto umidità nelle varie stratigrafie

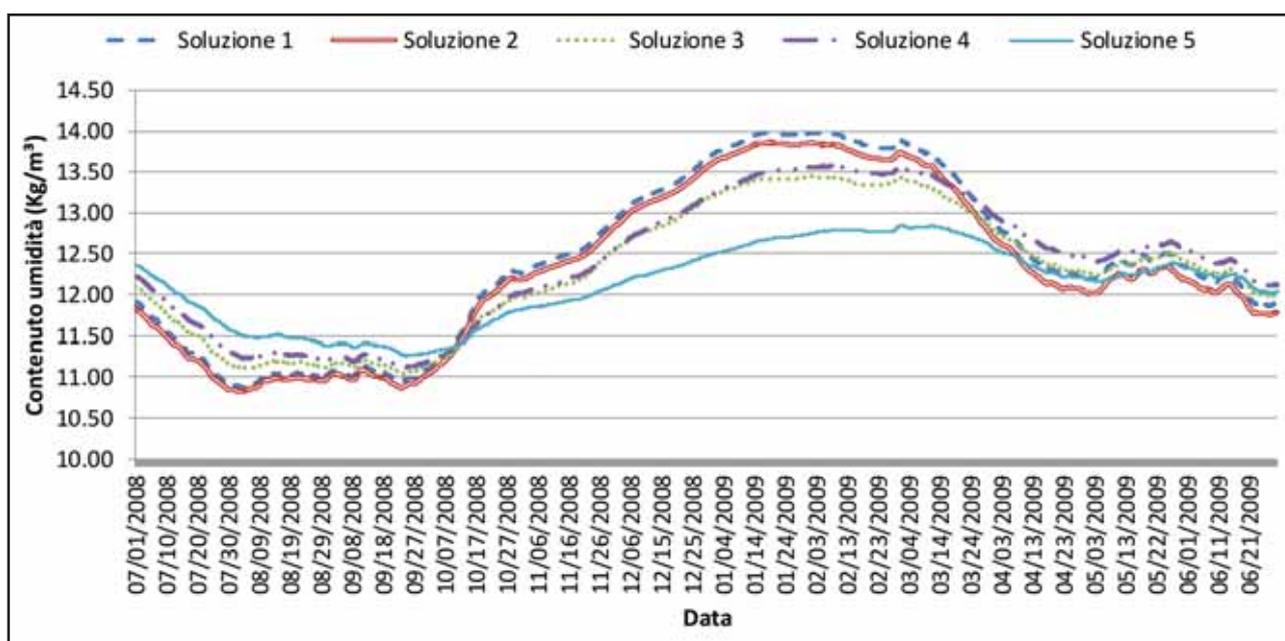


Figura 8: Andamento contenuto umidità nello strato di paglia

Dal momento che la paglia è un materiale altamente soggetto all'azione dell'acqua, la stratigrafia con minor contenuto di umidità interno si suppone che sia la soluzione migliore in termini di performance. Dal confronto delle simulazioni, mostrato nei due grafici sottostanti, si evince che una finitura più traspirante, come quella in intonaco di argilla, risulta essere quella più adeguata per una stratigrafia in paglia.

In particolare si poi nota una buona resa nell'utilizzo della soluzione 5, ossia la tecnica che prevede l'immersione delle facce esterna ed interna della balla di paglia in una soluzione liquida di argilla, prima di essere poi intonacata con intonaco d'argilla. Nonostante queste considerazioni, si può comunque notare come il comportamento delle soluzioni non si discosti di molto, e che quindi tutte siano adatte per un clima come quello di Milano.

Conclusioni

I materiali di origine naturale vegetale presentano ottime qualità sia in termini di isolamento termico che acustico.

Le prove suggerite dalla normativa per delineare le prestazioni termiche di un materiale sono adeguate per elementi omogenei che non presentano evidenti discontinuità.

La composizione solitamente fibrosa dei materiali naturali risulta quindi a volte un ostacolo per la loro analisi termica.

Una soluzione per ovviare a questo problema può essere l'utilizzo di software che simulino il comportamento igrotermico della stratigrafia. Si è mostrato infatti come la realizzazione di un modello numerico corrispondente alla realtà possa permettere di condurre analisi predittive affidabili su pareti caratterizzate da materiali non omogenei.

Le simulazioni descritte nell'articolo sono caratterizzate da condizioni al contorno stazionarie, data la necessità di riprodurre il set di laboratorio.

Per tale ragione molte variabili sono state trascurate per rappresentare fedelmente la realtà e il software WUFI non è stato utilizzato al pieno delle sue potenzialità. Un interessante sviluppo futuro è sicuramente lo studio del comportamento di un provino in situ, attraverso la misurazione di temperatura e umidità all'interno del muro durante un periodo più lungo.

Partendo da condizioni al contorno variabili, basate cioè sul dato climatico reale, le simulazioni con WUFI potranno essere condotte in regime dinamico tenendo conto di tutti i parametri omessi in un calcolo stazionario. ■

** Alessandra Mesa,
Assegnista di ricerca presso il DICATAM,
Università di Brescia*

*Alberto Arenghi
Professore Associato di Architettura Tecnica
presso il DICATAM, Università di Brescia*

Bibliografia

[1] UNI EN ISO 6946 (Marzo 2018), Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo, Milano, IT

[2] UNI EN ISO 8990 (Giugno 1999), Determinazione delle proprietà di trasmissione termica in regime stazionario-Metodo della doppia camera calibrata e della doppia camera con anello di guardia, Milano, IT

[3] UNI ISO 9869-1:2015 (Ottobre 2015), Isolamento termico - Elementi per l'edilizia - Misurazione in situ della resistenza termica e della trasmittanza termica - Parte 1: Metodo del termoflussimetro, Milano, IT

[4] UNI EN 1934 (Maggio 2000), Determinazione della resistenza termica per mezzo del metodo della camera calda con termoflussimetro, Milano, IT

[5] UNI EN ISO 10456:2008 (Maggio 2008), Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà igrometriche - Valori tabulati di progetto e procedimenti per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto, Milano, IT

[6] UNI EN 12664:2002 (febbraio 2002), Prestazione termica dei materiali e dei prodotti per edilizia - Determinazione della resistenza termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia e con il metodo del termoflussimetro - Prodotti secchi e umidi con media e bassa resistenza termica, Milano, IT

[7] UNI EN 12667:2002 (Febbraio 2002), Prestazione termica dei materiali e dei prodotti per edilizia - Determinazione della resistenza termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia e con il metodo del termoflussimetro - Prodotti con alta e media resistenza termica, Milano, IT

[8] UNI EN 12939: 2002 (Dicembre 2002), Prestazione termica dei materiali e dei prodotti per edilizia - Determinazione della resistenza termica per mezzo della piastra calda con anello di guardia e del metodo del termoflussimetro - Prodotti spessi con resistenza termica elevata e media, Milano, IT

[9] UNI EN 15026 (Luglio 2008), Prestazione termoisometrica dei componenti e degli elementi di edificio - Valutazione del trasferimento di umidità mediante una simulazione numerica, Milano, IT